УДК 550.831+550.312



**Ю. І. Дубовенко, О. А. Чорна**

# До проблеми гравітаційного моніторингу геологічного середовища

*(Представлено академіком НАН України В. І. Старостенком)*

*Зважаючи на особливості 4D гравітаційного моніторингу в локальних умовах, обробку його даних на коротких профілях запропоновано обчислювати за співвідношенням зі швидкоспадними ядрами. Варіації гравітаційного поля через вплив малоінтенсивних геофізичних факторів треба враховувати за методикою Двуліта.*

Технологічний прогрес в умовах економічного спаду двояко вплинув на кількість і методику здійснення великомасштабних геофізичних робіт — зросла точність і продуктивність гравіметричних знімань (через удосконалення апаратури й топогеодезичного забезпечення GPS) і різко знизився обсяг вимірів. Перше спричинило необхідність перегляду методів обробки отриманих даних, зокрема більш точніший облік поправок Буге [1]. Останнє, за необхідності виявляти глибинні джерела аномалій, вимагає перегляду методики вимірів, щоб врахувати тонкі особливості гравітаційних аномалій. Ці особливості можна "підсікти", задіявши додаткову змінну — час.

Світові "тренди" геофізичних спостережень тяжіють до 4D моніторингу [2] досліджуваної площі, вивчаючи еволюцію гравітаційного поля за час експлуатації ділянки або в інтервалі її динамічної активізації. Ідея моніторингу зауважена у [3], а деякі її додатки ілюструє [4].

Застосування *повторних* спостережень у деякій області [5, 6] в гравіметрії не нове, хоча *неперервними* в часі їх назвати важко, на відміну від сейсмометрії.

При проведенні високоточних вимірів, параметром яких є сила тяжіння, варто обов'язково досліджувати й враховувати її варіації [7], щоб ввести відповідні поправки у гравітаційні знімання різних років. В роботі [7] виділені неприпливні квазіперіодичні варіації (КПВ) сили тяжіння на новій методологічній, методичній і метрологічній базі та обгрунтована їхня природа. Внаслідок кореляції великомасштабних густинних неоднорідностей мантії і припливних параметрів Землі [8] можлива кроскореляція КПВ і цих параметрів.

*Гравітаційний моніторинг* — це ряд *періодично* повторюваних у реальному часі *неперервних* протягом фіксованого часового відтинку мікрогравіметричних вимірів гравітаційного поля й обробка його даних з урахуванням *впливу* навколишнього середовища та сфери застосувань. Величина часового відтинку залежить від якості вимірів, міри невизначеності результатів спостережень, динаміки (амплітуди і частоти) поля. Його фізична основа — неперервний зв'язок динаміки гравітаційного поля і параметрів середовища. Просторовий розподіл варіацій вертикальної похідної $V_z$ потенціалу сили тяжіння *прямо корелює* із площинним розподілом густин, а часові варіації $V_z$ чітко визначають вертикальні варіації насичення флюїдів.

Апаратна основа моніторингу — спільні великомасштабні виміри перевищень рельєфу за даними GPS і абсолютних значень сили тяжіння. Відносні виміри сили тяжіння дешевші,

але обмежені прив'язкою до опорної мережі і синхронністю обліку "сповзання нуля". За наших умов такі виміри за належного методичного забезпечення мають перспективу.

У дослідженнях з 4D гравімоніторингу відзначена амплітуда сигналу в діапазоні від 20 до 80 мГал, у межах діючих вулканів вона зростає до 300–600 мГал, а в межах водних басейнів $\sim$ 200–250 мГал при нелінійному обліку "сповзання нуля".

Мета моніторингу — оцінка глибини до джерела аномалій і зміни об'єму за даними деформації рельєфу (з даних GPS) — вимагає знання приповерхневого розподілу мас (з даних гравіметрії).

Виділяють слабкий сигнал на тлі перешкод за відомими в гравіметрії методами кореляційного аналізу і обчислення деяких складових градієнтів у прямих вимірах сили тяжіння. У роботі [2] виділяють корисний сигнал з різницевої аномалії $\Delta g_d = \Delta g_m - \gamma h_z - \Delta g_{\rm def} - \Delta g_w$, де $\Delta$ — різниця між сусідніми відліками у часі; $\gamma = -308{,}6$ мГал/м — поправка у вільному повітрі; $h_z$ — вертикальний зсув (відносне підняття-опускання); $\Delta g_{\rm def}$ — аномалія Буге деформації (зміни об'єму через стиск середовища навколо джерела, що означає зсув густинних меж у неоднорідному середовищі); $\Delta g_w = 2\pi G \rho_w \varphi \delta_z = 42\varphi\delta_z$ — вплив грунтових вод. Також порівнюють результати фільтрації з даними, отриманими з контрольного пункту, близько розташованого від ділянки спостережень.

На рівнинних ділянках корисний сигнал має малий градієнт і слід враховувати вплив перешкод іншими методами (зміна геометрії мережі спостережень, часова фільтрація, обчислення похідних тощо), пропонованими в публікації [7]. Вивчення метрологічних нюансів доцільне на базі геодинамічного полігону з готовою інфраструктурою.

Виміри на *регулярній* мережі і перерахунок значень за інтегралом Пуассона придатні для регіональних досліджень [9], а в локальних умовах гравімоніторингу [10] має ряд недоліків [11]. Іноді організація регулярної мережі неможлива, а перерахунок з нерегулярної мережі на регулярну складніший, ніж обернене відновлення будови середовища.

Розв'язання обернених задач гравіметрії з даними на псевдорегулярних мережах із застосуванням моделей середовища типу "нескінченний профіль" утворює погано зумовлені системи лінійних рівнянь із беззмістовними результатами. Через це та коротку довжину реальних профілів доцільний альтернативний підхід [15] — система лінійних інтегральних рівнянь зі швидкоспадними ядрами:

$$S^+_{n+1}(x) = v(x) - \frac{1}{2\zeta_n(x)} \int\limits_{-\infty}^{\infty} S^+_n(\xi)\left(\operatorname{ch}\frac{\pi(\xi - x)}{2\zeta_n(x)}\right)^{-1} d\xi + S^+_n(x),$$

$$S^-_{n+1}(x) = v(x) - \frac{1}{2\zeta_n(x)} \int\limits_{-\infty}^{\infty} S^-_n(\xi)\left(\operatorname{th}\frac{\pi(\xi - x)}{2\zeta_n(x)}\right)^{-1} d\xi + S^-_n(x),$$

$$\zeta_0(x) = S^+_0(x) + S^-_0(x) = v(x), \qquad \zeta_0(x) = S^+_0(x) + S^-_0(x), \qquad n = \overline{0, \infty}.$$

З урахуванням цього методика [10] дієва за умов, що регіональний фон — поліном 1-го ступеня, відомі *густини* й *положення* меж тяжіючих тіл на поверхні, а тіла близькі або мають спільні контакти. Пропонуємо у методиці [10] використати комплекс [12] і програми з [11].

У публікації [2] не враховано особливість варіацій гравітаційного поля: величини його похідних залежні від флуктуацій аномальних атмосферних мас, снігових мас, рівня грунтових вод, лісистості і змін рельєфу через техногенну діяльність [13]. Урахувати ці ефекти можна,

вносячи поправки у розв'язок прямих задач гравіметрії на дослідних територіях. Так, вплив тяжіння атмосферних мас у центральній сферичній зоні (сферична трапеція $1^\circ \times 1^\circ$) навколо пункту спостережень на величину гравіполя визначає формула [13] $\delta g_0 = 0{,}269\Delta P$, де $\Delta P$ — аномалія атмосферного тиску; вплив снігових мас — $\delta g_0 = -2\pi f\sigma$; $\sigma$ — густина снігу; вплив рівня грунтових вод — $\delta g \cong 2\pi f\sigma h$, де $h$ — амплітуда коливання рівня вод; техногенна зміна рельєфу — $\delta g = \gamma \cdot \Delta h/L$, де $\Delta h$ — перевищення між пунктами спостережень за рік; $L$ — відстань між пунктами.

Необгрунтоване спрощення моделей середовища з метою зниження неоднозначності у багатьох випадках є причиною невірних обчислень геометрії джерел, вертикального і латерального розподілу густинних неоднорідностей, особливо у випадках, коли середовище навколо аномального джерела далеке від припущень про однорідність. Надійне тлумачення одержують за *відомої геометрії* тіл, що тяжіють, (із сейсморозвідки) і комплексної інтерпретації поля сили тяжіння та деформацій рельєфу.

Враховувати наявну апріорну інформацію про середовище пропонуємо:

1. Побудовою належних модельних зображень (зіркові області відомої густини усередині компактних множин у банаховому просторі даних) [11].

2. Доданням у функціонали типу нев'язки у регуляризуючих алгоритмах стабілізаторів диференціального виду, власні функції яких збігаються з власними функціями вихідних операторів [14].

Розв'язання обернених задач доцільно здійснювати за алгоритмами [15] і подібними їм на основі розробок [11, 12]. З розв'язку оберненої задачі гравіметрії за даними моніторингу можна відновити *загальну* картину варіацій густини (об'єму вуглеводнів), але не абсолютні значення густин. Розв'язок спряженої оберненої задачі (тлумачення часових варіацій гравіаномалій внаслідок зміни положення водонафтового контакту або рівня пластових вод) придатний для моніторингу підземних екосистем.


1. *Бычков С. Г.* К вопросу о вычислении аномалий силы тяжести в редукции Буге // IX Геофиз. чтения им. В. В. Федынского, 1–3 марта 2007 г.: Тез. докл. – Пермь, 2007. – С. 73–77.
2. *Battaglia M., Gottsmann J., Carbone D., Fernandez J.* 4D volcano gravimetry // Geophysics. – 2008. – **73**, No 6. – P. WA3-WA18.
3. *Лоссовский Э. К.* О философии чистой априорной математики как главного конструктивного опорного раздела современного теоретического естествознания: Обзор // Геофиз. журн. – 2006. – **28**, № 2. – С. 80–93.
4. *Юргин О. В.* Высокоточная гравиразведка при измерении гравитационных эффектов малоглубинного происхождения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – 25.00.10. – Пермь, 2006. – 26 с.
5. *Алексидзе М. А.* Решение некоторых основных задач гравиметрии. – Тбилиси: Мецниереба, 1985. – 412 с.
6. *Юркина М. И.* Определение измерений гравитационного поля и вертикальных движений земной коры по повторным гравиметрическим и нивелирным наблюдениям // Геодезия и картография. – 1978. – № 4. – С. 30–35.
7. *Собакарь Г. Т.* Квазипериодические вариации силы тяжести Земли, их природа и научно-прикладное значение // Геофиз. сб. АН УССР. – 1972. – Вып. 46. – С. 31–42.
8. *Лубков М. В.* О влиянии крупномасштабных неоднородностей мантии на суточные числа Лява // Геофиз. журн. – 2011. – **33**, № 1. – С. 55–61.
9. *Davis K., Li Y., Batzle M.* Time-lapse gravity monitoring: a systematic 4D approach with application to aquifer storage and recovery // Geophysics. – 2008. – **73**, No 6. – P. WA61-WA69.
10. *Болотнова Л. А.* Эколого-геологическое изучение состояния геологической среды урбанизированных территорий: геофизический аспект // IX Геофиз. чтения им. В. В. Федынского, 1–3 марта 2007 г.: Тез. докл. – Пермь, 2007. – С. 43–44.

11. *Дубовенко Ю. И.* Определение контактной границы по значениям производных логарифмического потенциала на существенно ограниченных множествах: Автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук. 04.00.22. – Киев, 2005. – 19 с.
12. *Старостенко В. И., Легостаева О. В., Макаренко И. Б. и др.* Об автоматизированном вводе в компьютер изображений геолого-геофизических карт с разрывами 1-го рода и визуализации в интерактивном режиме 3-мерных геофизических моделей и их полей // Геофиз. журн. – 2004. – **26**, № 1. – С. 3–13.
13. *Двуліт П. Д.* Методи врахування впливу геофізичних факторів на варіації гравітаційного поля Землі: Дис. … д-ра техн. наук: 05.24.01. – Львів, 1999. – 225 с.
14. *Черная О. А.* Об устойчивых способах решений задач определения звездных областей, близких к заданным. Ч. 1, 2 // Геофиз. журн. – 1999. – **21**, № 3. – С. 100–118; № 6. – С. 51–71.
15. *Тихонов А. Н., Гоначарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г.* Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. – Москва: Наука, 1983. – 200 с.

*Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна*
*НАН України, Київ*

*Надійшло до редакції 31.08.2010*

**Yu. I. Dubovenko, O. A. Chorna**

## To the problem of a gravity monitoring of geological media

*Due to peculiarities of the 4D gravity monitoring, the processing of its data on the short profiles is offered to be executed by the expressions with fast decaying kernels. Due to the impact of low-intensity geophysical factors, the gravity fluctuations should be taken into account by the Dvulit's technique.*